

DE19733516-A1

Blind load compensation method for AC voltage network has voltage converter providing compensation voltage offset in phase from line voltage directly coupled to network line

The blind load compensation method for an AC voltage network uses a voltage converter (11). The switched semiconductors are connected in a bridge circuit. The semiconductors provide a compensation voltage (Ucomp) that is phase offset from the network line voltage, supplied directly to the network line (10) via a serial connection.; USE - For electronic power applications. ADVANTAGE - Reduced circuit complexity. DESCRIPTION OF DRAWING(S) - The figure shows a compensation circuit with a voltage converter in series with the network line. (10) Network line; (11) Voltage converter; (Ucomp) Compensation voltage.



(19) BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

(12) **Offenlegungsschrift**
(10) **DE 197 33 516 A 1**

(51) Int. Cl. 6:
H 02 J 3/18
H 02 M 7/00

DE 197 33 516 A 1

(21) Aktenzeichen: 197 33 516.0
(22) Anmeldetag: 4. 8. 97
(43) Offenlegungstag: 11. 2. 99

(71) Anmelder:

Asea Brown Boveri AG, Baden, Aargau, CH

(74) Vertreter:

Lück, G., Dipl.-Ing. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 79761
Waldshut-Tiengen

(72) Erfinder:

Stemmler, Herbert, Prof., Kirchdorf, CH

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
zu ziehende Druckschriften:

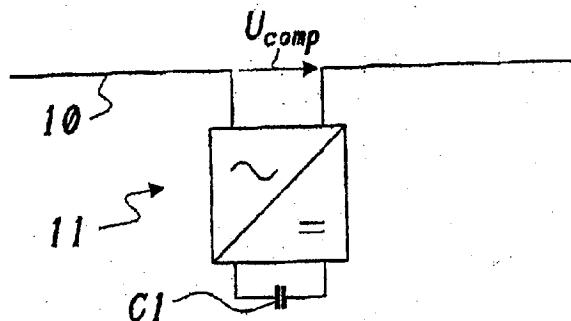
GB 22 42 792 A
GB 9 34 974

STILL,Ludwig: Neuer stromeinprägender
Wechselrichter mit GTO-Löschtung. In:
etzArchiv, Bd.9, 1987, H.10, S.309-313;
NUSS,Uwe: Regelungstechnische Konzeption
einer Blindleistungskompensationseinrichtung
für hohe dynamische Anforderungen. In:
etzArchiv, Bd.10, 1988, H.2, S.41-46;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Verfahren zum Einspeisen von Blindleistung in ein Wechselspannungsnetz sowie Wechselrichter für ein solches Verfahren

(57) Bei einem Verfahren zum Einspeisen von Blindleistung in ein Wechselspannungsnetz, bei welchem Verfahren für wenigstens eine Leitung (10) des Netzes eine zum Strom in der Leitung (10) phasenverschobene Kompensationsspannung (U_{comp}) erzeugt und in die Leitung (10) eingekoppelt wird, wird eine vereinfachte Kompensation dadurch erreicht, daß die Kompensationsspannung (U_{comp}) aus einer Gleichspannung mittels eines mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in Brückenschaltung aufgebauten Wechselrichters (11) erzeugt wird, und daß die Kompensationsspannung (U_{comp}) direkt in die Leitung (10) seriell eingekoppelt wird.



DE 197 33 516 A 1

Beschreibung

TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf das Gebiet der Leistungselektronik. Sie betrifft ein Verfahren zum Einspielen von Blindleistung in ein Wechselspannungsnetz, bei welchem Verfahren für wenigstens eine Leitung des Netzes eine zum Strom in der Leitung phasenverschobene Kompensationsspannung erzeugt und in die Leitung eingekoppelt wird. Die Erfindung betrifft weiterhin einen Wechselrichter zum Einsatz in einem solchen Verfahren.

STAND DER TECHNIK

In elektrischen Energieübertragungssystemen wird die Verteilung der Leistungsflüsse ohne Steuerungsmaßnahmen durch die Impedanzverhältnisse der in einem Netz zusammengehaltenen Übertragungsleitungen bestimmt. Durch den Einsatz von seriellen Kompensationen kann durch die Injektion von Blindleistung über eine serielle Spannungseinkopplung die elektrisch wirksame Impedanz einer Übertragungsleitung verändert werden. Durch diese Maßnahme ändert sich die komplexe Spannungsdifferenz zwischen den Anschlußpunkten und damit der Leistungsfluß über die Leitung. Durch Serienkompensation können Leitungen gezielt belastet und die gesamte Übertragungskapazität effektiver ausgenutzt werden. Dies beschränkt sich nicht auf Drehstromübertragungssysteme. Auch der Einsatz in 1-phasigen Wechselstromsystemen ist möglich.

Bei bestehenden Anlagenkonzeptionen kann man allgemein die thyristorgeschaltete bzw. thyristorgeregelte Serienkompensation und die statische Synchronkompensation unterscheiden. Die thyristorgeregelte Serienkompensation besteht aus mehreren in Serie geschalteten Modulen, die in jede Phase einer Drehstromübertragungsleitung eingebaut sind. Aufgrund der einsetzbaren Thyristortechnik ist hier pro Modul eine Parallelschaltung einer Kapazität und einer geregelten (thyristorgeschalteten) Induktivität erforderlich. Der Schutz dieser Parallelschaltung gegen Überlastung erfordert zusätzlich eine Komponente, die beispielhaft als Varistor ausgebildet sein kann. Der Nachteil dieser bekannten Anlagenkonfiguration liegt im wesentlichen darin, daß die Halbleiterchalter netzgeführt betrieben werden, wodurch sich ein sehr eingeschränkter Arbeitsbereich ergibt.

Statische Synchronkompensationen wirken elektrisch durch die Einkopplung einer Zusatzspannung (Kompensationsspannung) senkrecht zum Leistungsstrom (Phasenverschiebung von 90°). Die Einkopplung dieser Zusatzspannung erfordert einen Transformator, der in Serie zu einer zu kompensierenden Übertragungsleitung geschaltet wird. Der erforderliche Transformator zur Einkopplung der Zusatzspannung hat einen vergleichsweise hohen Kostenanteil an den Gesamtkosten einer solchen Anlage.

DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Kompensationsverfahren anzugeben, das einen deutlich reduzierten Schaltungsaufwand erfordert und dennoch flexibel in der Anwendung ist.

Die Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs genannten Art dadurch gelöst, daß die Kompensationsspannung aus einer Gleichspannung mittels eines mit abschaltbaren Leistungshalbleitern in Brückenschaltung aufgebauten Wechselrichters erzeugt wird, und daß die Kompensationsspannung direkt in die Leitung seriell eingekoppelt wird. Durch Verwendung einer halbleiterbestückten Wechselrich-

terbrücke kann auf einfache Weise eine weitgehend sinusförmige Kompensationsspannung mit beliebiger vorbestimmter Phasenlage erzeugt werden. Durch die direkte serielle Einspeisung in die zu kompensierenden Leitung kann auf zusätzliche Einkopplungselemente wie Transformatoren oder dgl. verzichtet werden.

Eine erste bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist dadurch gekennzeichnet, daß als Gleichspannungsquelle für den Wechselrichter wenigstens 10 ein aufgeladener Kondensator verwendet wird. Da die Kompensationseinrichtung im wesentlichen Blindleistung einkoppelt, steht mit dem Kondensator eine einfache und günstige Gleichspannungsquelle zur Verfügung.

In einer ersten bevorzugten Weiterbildung dieser Ausführungsform wird der wenigstens eine Kondensator über den Wechselrichter aus der Leitung des Wechselspannungsnetzes aufgeladen. Dadurch entfallen zusätzliche Spannungsversorgungseinrichtungen und die Kompensationsschaltung wird besonders einfach.

Eine zweite bevorzugte Weiterbildung dieser Ausführungsform ist dadurch gekennzeichnet, daß der wenigstens eine Kondensator über einen separaten Stromrichter gespeist wird. Diese Bereitstellung der Gleichspannung in einer Art Gleichspannungszwischenkreis ist dann von Vorteil, 25 wenn die Kompensationsschaltung neben der reinen Blindleistung in die Leitung einkoppeln soll.

Eine weitere bevorzugte Ausführungsform des Verfahrens nach der Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß das Wechselspannungsnetz 3-phasisch ausgebildet ist, und daß für 30 jede der 3 Phasen in einer zugehörigen Leitung ein zugehöriger Wechselrichter zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung in Serie geschaltet ist. Hierdurch kann für jede Phase getrennt die gewünschte Kompensation durchgeführt werden.

Eine andere bevorzugte Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, daß die Wechselrichter jeweils zwei Halbbrücken umfassen, und daß die Halbbrücken nach Maßgabe eines sinusförmigen Modulationssignals pulsdauermoduliert angesteuert werden. Durch die Pulsdauermodulation kann 40 mit geringem Aufwand die vom Wechselrichter erzeugte Ausgangsspannung einem sinusförmigen Verlauf stärker angenähert werden, wodurch der Oberschwingungsgehalt verringert wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn gemäß einer bevorzugten Weiterbildung dieser Ausführungsform die Wechselrichter als 2-Punkt-Brücken ausgebildet

sind, und die einzelnen Halbbrücken durch Anwendung entsprechender Trägersignale zeitversetzt getaktet werden, oder wenn die Wechselrichter als N-Punkt-Brücken ($N \geq 3$) ausgebildet sind, und daß die einzelnen Halbbrücken durch 50 Anwendung entsprechender Trägersignale derart zeitversetzt getaktet werden, daß sich die resultierende Kompensationsspannung aus einer Überlagerung mehrerer zeitversetzt getakteter pulsdauermodulierter Kompensationsteilspannungen ergibt.

Eine weitere Verringerung der Oberschwingungsbelaustung läßt sich erreichen, wenn gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens in einer Leitung des Wechselspannungsnetzes mehrere Wechselrichter zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung in Serie und/oder parallel geschaltet sind, die Wechselrichter jeweils pulsdauermoduliert angesteuert werden, und die Pulsdauermodulation in den einzelnen Wechselrichtern mit zeitversetzter Taktung erfolgt. Zugleich ergibt sich mit der Serieschaltung mehrerer Wechselrichter ein vergrößerter Betriebsbereich hinsichtlich der Spannung, und mit der Parallelschaltung ein vergrößerter Betriebsbereich hinsichtlich des Stromes.

Eine weitere Verringerung der Oberschwingungen ergibt

sich, wenn gemäß einer anderen Ausführungsform am Ausgang der Wechselrichter wenigstens eine Filterschaltung angeordnet ist, die insbesondere eine zum Wechselrichter in Serie geschaltete Induktivität und wenigstens einen zu der Serieschaltung aus Wechselrichter und der wenigstens einen Induktivität parallel geschalteten Kondensator umfaßt. Besonders einfach ist es, wenn das Wechselspannungsnetz einen Netztransformator mit Streuinduktivitäten umfaßt, und die Streuinduktivität des Netztransformators als Teil der Filterschaltung verwendet wird.

Der Arbeitsbereich der Kompensationsschaltung kann erweitert werden, wenn gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Wechselrichter jeweils mit wenigstens einem Kondensator und/oder mit einer Induktivität in Serie geschaltet sind.

Besonders günstig hinsichtlich der Anforderungen an die Isolation der Kompensationsschaltung ist es, wenn gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung das Wechselspannungsnetz einen Netztransformator mit einem auf niedrigem Potential liegenden neutralen Punkt aufweist, und die Kompensationsspannung am neutralen Punkt eingekoppelt wird.

Ist das Wechselspannungsnetz ein 3-phäsiges Netz, und ist innerhalb des Netzes ein 3-phägiger Netztransformator vorgesehen, welcher als neutralen Punkt einen Sternpunkt aufweist, wird in jede der zum Sternpunkt führenden Leitungen eine entsprechende Kompensationsspannung eingekoppelt. Dies kann einerseits dadurch geschehen, daß in jede der zum Sternpunkt führenden Leitungen jeweils ein Wechselrichter zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung in Serie geschaltet ist. Dies kann andererseits aber auch dadurch geschehen, daß die zum Sternpunkt führenden Leitungen an die Ausgänge eines 3-phäsgigen Wechselrichters angeschlossen sind. Der 3-phägige Wechselrichter hat dabei den besonderen Vorteil, daß die Kondensatoren auf der Gleichspannungsseite bei gleicher Kompensationsspannung kleiner gewählt werden können, weil hier keine pulsierende Leistung zu berücksichtigen ist.

Ist das Wechselspannungsnetz 1-phäsig, und ist innerhalb des Netzes ein 1-phägiger Netztransformator vorgesehen, der zumindest auf einer Seite eine Nullpunktsschaltung mit einem Nullpunkt als neutralen Punkt aufweist, wird in jede der zum Nullpunkt führenden Leitungen eine entsprechende Kompensationsspannung eingekoppelt. Dies geschieht entweder dadurch, daß in jede der zum Nullpunkt führenden Leitungen ein Wechselrichter zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung in Serie geschaltet ist, oder dadurch, daß die zum Nullpunkt führenden Leitungen an die Ausgänge eines 1-phäsgigen Wechselrichters angeschlossen sind.

Der erfindungsgemäße Wechselrichter für das Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, daß der Wechselrichter als N-Punkt-Brücke ($N \geq 2$) ausgebildet ist.

Eine für kleinere Spannungen (z. B. ein 13-kV-Netz) geeignete Ausführungsform des erfindungsgemäßen Wechselrichters ist dadurch gekennzeichnet, daß in jeder der Halbbrücken nur ein Leistungshalbleiter pro Brückenzweig angeordnet ist.

Eine für größere Spannungen (z. B. ein 400-kV-Netz) geeignete Ausführungsform des erfindungsgemäßen Wechselrichters ist dadurch gekennzeichnet, daß in jeder der Halbbrücken mehrere in Serie geschaltete Leistungshalbleiter pro Brückenzweig angeordnet sind.

In einer besonders bevorzugten Weiterbildung dieser Ausführungsform werden als abschaltbare Leistungshalbleiter GTOs verwendet, welche hart angesteuert werden. Unter harter Ansteuerung wird dabei eine Ansteuerung verstanden, wie sie z. B. in den Druckschriften EP-A1-0 489 945

oder WO-93/09600 oder ABB Technik 5 (1996), S. 14-20 beschrieben worden sind.

Weitere Ausführungsformen ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

KURZE ERLÄUTERUNG DER FIGUREN

Die Erfindung soll nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen im Zusammenhang mit der Zeichnung näher erläutert werden. Es zeigen

Fig. 1 das Prinzipschaltbild einer Kompensationsschaltung nach der Erfindung mit einem zu einer Leitung in Serie geschalteten Wechselrichter;

Fig. 2 den prinzipiellen inneren Aufbau des Wechselrichters aus **Fig. 1** gemäß einem ersten bevorzugten Ausführungsbeispiel in Form einer 2-Punkt-Brücke mit halbleiterbestückten Umschaltern und zusätzlichem Saugkreis auf der Gleichspannungsseite;

Fig. 3 ein Beispiel für den inneren Aufbau eines Umschalters nach **Fig. 2** mit einem Leistungshalbleiter (rückwärtsleitenden GTO) pro Brückenzweig;

Fig. 4 ein Beispiel für den inneren Aufbau eines Umschalters nach **Fig. 2** mit einer Serieschaltung von mehreren Leistungshalbleitern (rückwärtsleitenden GTOs) pro Brückenzweig;

Fig. 5 ein beispielhaftes Schema der auftretenden Spannungsformen bei einer pulsdauermodulierten Ansteuerung der 2-Punkt-Brücke nach **Fig. 2**;

Fig. 6 den prinzipiellen inneren Aufbau des Wechselrichters aus **Fig. 1** gemäß einem zweiten bevorzugten Ausführungsbeispiel in Form einer 3-Punkt-Brücke mit halbleiterbestückten Umschaltern;

Fig. 7 ein Beispiel für den inneren Aufbau eines Umschalters nach **Fig. 6** mit einem Leistungshalbleiter (rückwärtsleitenden GTO) pro Brückenzweig;

Fig. 8 ein Beispiel für den inneren Aufbau eines Umschalters nach **Fig. 6** mit einer Serieschaltung von mehreren Leistungshalbleitern (rückwärtsleitenden GTOs) pro Brückenzweig;

Fig. 9 ein beispielhaftes Schema der auftretenden Spannungsformen bei einer pulsdauermodulierten Ansteuerung der 3-Punkt-Brücke nach **Fig. 6**;

Fig. 10 die Grundschaltung eines nach der Erfindung in allen drei Phasen kompensierten Drehstromnetzes;

Fig. 11 die Grundschaltung eines nach der Erfindung kompensierten 1-phäsgigen Wechselspannungsnetzes;

Fig. 12 ein Ausführungsbeispiel einer Kompensationsschaltung nach der Erfindung mit einer am Ausgang des Wechselrichters angeordneten Filterschaltung aus zwei seriellen Induktivitäten und einem parallel geschalteten Kondensator zur Filterung der Oberschwingungen;

Fig. 13 ein Ausführungsbeispiel einer Kompensationsschaltung nach der Erfindung gemäß **Fig. 12** mit einem zusätzlich in Serie geschalteten Kondensator zur Erweiterung des Betriebsbereiches;

Fig. 14 ein Ausführungsbeispiel einer Kompensationsschaltung nach der Erfindung gemäß **Fig. 13** mit einer zusätzlich in Serie geschalteten Induktivität zur Erweiterung des Betriebsbereiches, wobei wahlweise die zusätzliche Induktivität oder der zusätzliche Kondensator durch Schalter eingesetzt werden können;

Fig. 15 das Prinzipschaltbild einer Serie- und/oder Parallelschaltung von mehreren Wechselrichtern (mit zeitversetzter Taktung) und lokalen Filterschaltungen zur Erhöhung des Arbeitsbereiches und Verringerung des Oberschwingungsgehalts;

Fig. 16 eine zu **Fig. 15** entsprechende Serienschaltung mit konzentrierter Filterschaltung und zusätzlicher Induktivität;

vität zur Erweiterung des Betriebsbereiches;

Fig. 17 eine bevorzugte Kompensation nach der Erfindung auf der Niederpotentialseite (Sternpunkt) eines Drehstromtransformators;

Fig. 18 eine bevorzugte Kompensation nach der Erfindung auf der Niederpotentialseite (am Nullpunkt) eines 1-phasigen Netztransformators;

Fig. 19 eine Vereinfachung der Anordnung nach **Fig. 17**, bei welcher die verschiedenen Wechselrichter durch eine 3-phasige Brücke ersetzt sind;

Fig. 20 eine Vereinfachung der Anordnung nach **Fig. 18**, bei welcher die verschiedenen Wechselrichter durch eine 1-phasige Brücke ersetzt sind; und

Fig. 21 die Verwendung der Streuinduktivität eines Netztransformators als Induktivität für den Wechselrichter.

WEGE ZUR AUSFÜHRUNG DER ERFINDUNG

In **Fig. 1** ist das Prinzipschaltbild einer Kompensationsschaltung nach der Erfindung in seiner einfachsten Form wiedergegeben. Innerhalb einer 1-phasigen oder 3-phasigen Wechselspannungsnetzes wird zur Kompensation eine Leitung **10** ausgewählt. Die Leitung **10** wird aufgetrennt und ein Wechselrichter **11** wird direkt mit der Leitung **10** in Serie geschaltet. Aus einer Gleichspannung, die aus einem Kondensator **C1** stammt, wird mittels des Wechselrichters **11** eine Wechselspannung erzeugt, die als Kompensationsspannung U_{comp} direkt in die Leitung **10** eingekoppelt wird. Der Wechselrichter **11** enthält gemäß **Fig. 2** eine 2-Punkt-Brückenschaltung aus zwei Halbbrücken **12** und **13**, deren Funktion durch einen Umschalter **U1** bzw. **U2** charakterisiert werden kann. Der Wechselrichter **11** ist mit den Ausgängen seiner Halbbrücken **12**, **13** direkt an die Leitung **10** anschlossen. Durch geeignete Ansteuerung der Umschalter **U1,2** wird die am Kondensator **C1** anliegende Kondensatorspannung wahlweise als positive oder negative Spannung auf die Leitung **10** gegeben.

Die erzeugte Kompensationsspannung U_{comp} ist idealerweise eine sinusförmige Wechselspannung, die dem Wechselstrom auf der Leitung **10** um 90° voreilt oder um 90° nacheilt. Dazu werden Strom und Spannung auf der Leitung gemessen und aus den Messsignalen in einer Steuerelektronik die Ansteuerimpulse für die Umschalter **U1,2** abgeleitet. Dies geschieht vorzugsweise gemäß **Fig. 5** dadurch, daß ein sinusförmiges Modulationssignal U_M der gewünschten Phasenlage erzeugt und in an sich bekannter Weise mit zwei dreieckförmigen Trägersignalen U_{C1}, U_{C2} verglichen wird. Aus den Schnittpunkten der Signale werden Schaltbefehle für die Umschalter **U1,2** abgeleitet, die zu dem in **Fig. 5** unten dargestellten pulsdauermodulierten Kompensationsspannung U_{comp} führen. Die Arbeitsweise des Wechselrichters **11** führt dazu, daß der Kondensator **C1** wechselweise und mit doppelter Netzfrequenz Leistung aus dem Netz aufnimmt und Leistung an das Netz abgibt, wobei die zeitliche gemittelte Leistung Null ist. Zur Dämpfung dieser Pulsationen kann dem Kondensator **C1** ein Saugkreis **43** parallel geschaltet werden, der aus einer Serienschaltung einer Induktivität **L4** und einem Kondensator **C10** besteht und auf die doppelte Netzfrequenz abgestimmt ist.

Die Umschalter **U1,2** werden durch abschaltbare Leistungshalbleiter in der in **Fig. 3** und **4** dargestellten Weise realisiert. Als bewährte Bauelemente der Leistungselektronik werden für die abschaltbaren Leistungshalbleiter GTOs (Gate-Turn-Off-Thyristoren), insbesondere rückwärtsleitende GTOs, eingesetzt. Es können aber auch IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) oder andere abschaltbare Bauelemente verwendet werden. Der Spannungsbereich derartiger Leistungshalbleiter ist begrenzt. Bei kleineren

Netzspannungen (z. B. 13 kV) werden in den Brückenzweigen gemäß **Fig. 1** einzelne Leistungshalbleiter **S1** und **S2** eingesetzt. Bei hohen Netzspannungen (z. B. 400 kV) werden in den Brückenzweigen gemäß **Fig. 4** Serienschaltungen von vielen (n) Leistungshalbleitern **S11, ..., S1n** bzw. **S21, ..., S2n** eingesetzt. Werden GTOs in Serienschaltung verwendet, müssen besondere Vorkehrungen getroffen werden, um das gleichzeitige Schalten der einzelnen GTO-Elemente sicherzustellen. Durch die Anwendung einer "harten" Ansteuerung ist eine exakte Ansteuerung mehrere in Serie geschalteter GTOs möglich. Zu den charakteristischen Eigenschaften und der schaltungstechnische Realisierung der "harten" Ansteuerung sei auf die eingangs genannten Druckschriften aus dem Stand der Technik verwiesen.

Neben der bereits beschriebenen 2-Punkt-Brücke kann mit Vorteil aber auch eine 3-Punkt-Brücke oder noch allgemeiner eine N-Punkt-Brücke zur Erzeugung der Kompensationsspannung U_{comp} herangezogen werden. Die 3-Punkt-Brücke umfaßt gemäß **Fig. 6** zwei Umschalter **U3** und **U4** mit jeweils 3 Umschaltpunkten in zwei Halbbrücken **14** und **15**, die wahlweise die beiden Enden oder den Mittelabgriff einer Serieschaltung aus zwei Kondensatoren **C2, C3** mit dem jeweiligen Brückenausgang verbinden. Auf diese Weise werden zwei Kompensationsteilspannungen U_{12} und U_{34} erzeugt, die sich am Ausgang des Wechselrichters **11** zu der Kompensationsspannung U_{comp} addieren. Der eine Vorteil der 3-Punkt-Brücke liegt darin, daß zur Erzeugung derselben Kompensationsspannung statt eines großen zwei kleinere Kondensatoren genommen werden können. Der andere Vorteil liegt darin, daß bei einer zeitversetzten Taktung der auch hier vorzugsweise angewandten Pulsdauermodulation, wie sie in **Fig. 9** durch die phasenverschobenen Trägersignale $U_{C1}, ..., U_{C4}$ angedeutet ist, der Oberschwingungsanteil für die aus den (zeitversetzt getakteten) Kompensationsteilspannungen U_{12} und U_{34} zusammengesetzte Kompensationsspannung U_{comp} deutlich verringert werden kann. Die N-Punkt-Brücke ergibt sich, wenn analog zur 3-Punkt-Brücke Umschalter mit N Umschaltpunkten in den Halbbrücken eingesetzt werden.

Der innere Aufbau der Umschalter **U3,4** aus **Fig. 6** hat vorzugsweise die in **Fig. 7** und **8** dargestellte Form. Bei kleineren Netzspannungen sind in den Brückenzweigen gemäß **Fig. 7** einzelne Leistungshalbleiter **S3, ..., S6** in Form von rückwärtsleitenden GTOs mit entsprechenden Dioden **D1** und **D2** verschaltet. Bei hohen Netzspannungen treten an die Stelle der einzelnen Leistungshalbleiter jeweils Serienschaltungen aus n Leistungshalbleitern **S31, ..., S3n** bis **S61, ..., S6n**, die im Falle von GTOs wiederum "hart" angesteuert sind. Anstelle der GTOs können aber wiederum auch andere abschaltbare Leistungshalbleiter verwendet werden.

In den bisherigen Erläuterungen wurde die Kompensation nur im Bezug auf eine einzelne Leitung **10** betrachtet und erläutert. Handelt es sich bei dem Wechselspannungsnetz um ein Drehstromnetz, wird vorzugsweise gemäß **Fig. 10** je eine zu einer Phase gehörende Leitung **16, 17** und **18** kompensiert, indem in diese Leitung ein zugehöriger Wechselrichter **19, 20** und **21** der beschriebenen Art in Serie geschaltet wird. Beim 1-phasigen Netz, braucht gemäß **Fig. 11** nur in einer der beiden Leitungen **10, 22** ein Wechselrichter **11** eingeschleift zu werden. Es ist aber auch denkbar, in beide Leitungen **10, 22** jeweils einen Wechselrichter **11, 11'** einzuschalten.

Wie bereits oben erwähnt worden ist, kann durch eine geeignete pulsdauermodulierte Ansteuerung der Brückenzweige insbesondere auch im Fall der 3-Punkt-Brücke ein reduzierter Oberschwingungsanteil in der Kompensationsspannung U_{comp} erreicht werden. Zusätzlich können aber noch weitere Maßnahmen zur Reduktion ergriffen werden.

Eine solche Maßnahme besteht beispielsweise darin, am Ausgang des Wechselrichters 11 gemäß Fig. 12 eine Filterschaltung anzuordnen, die aus einem oder zwei in Serie liegenden Induktivitäten L1, L2 und einem parallel geschalteten Kondensator C4 besteht, und welche die Oberschwingungsanteile herausfiltert bzw. schwächt. Die Dimensionierung des Kondensators C4 richtet sich dabei nach den Taktfrequenzen der Pulsdauermodulation. Werden bei einer 3-Punkt-Brücke gemäß Fig. 6 zur Erzeugung der PDM-Ansteuersignale gemäß Fig. 9 vier um 90° phasenverschobene Trägersignale U_{C1}, \dots, U_{C4} mit der Frequenz F eingesetzt, ergibt sich in der Kompensationsspannung U_{comp} eine viermal höhere resultierende Pulsfrequenz 4F. Der Filterkondensator C4 wird dann einerseits groß genug gewählt, um die an ihm anliegende Spannung in einer guten Sinusform zu halten, und ist andererseits aber klein genug, um bei der Grundfrequenz nur einen kleinen Strom zu ziehen. Als Induktivität für eine Filterschaltung kann gemäß Fig. 21 mit Vorteil aber auch die Streuinduktivität L10 eines mit Streuinduktivitäten L10, L11 behafteten benachbarten Netztransformators 46 herangezogen werden.

Der Betriebsbereich, in welchem eine Kompensation möglich ist, wird bei dem Wechselrichter 11 maßgeblich durch die Amplitude der Kompensationsspannung U_{comp} bestimmt, die sich ihrerseits im wesentlichen nach der Spannung an dem Kondensator C1 (bei der 2-Punkt-Brücke) bzw. an den Kondensatoren C2 und C3 (bei der 3-Punkt-Brücke) richtet. Eine Erweiterung des Betriebsbereiches (auf der kapazitiven Seite) kann ohne Änderung des Wechselrichters 11 bzw. ohne Änderung bei den Schaltelementen dadurch erfolgen, daß dem Wechselrichter 11 gemäß Fig. 13 ausgangsseitig ein Kondensator C5 in Serie geschaltet wird. Zur Erweiterung des Betriebsbereiches (auf der induktiven Seite) kann anstelle des Kondensators eine Induktivität (L5 in Fig. 14) in Serie geschaltet werden. Die Bereichserweiterung läßt sich gemäß Fig. 14 wahlweise und umschaltbar gestalten, wenn Kondensator C5 und Induktivität L5 in Serie liegend durch entsprechende Schalter 44, 45 überbrückbar sind. Auch in Fall der Fig. 21 ist zur Erweiterung des Betriebsbereiches die Serienschaltung mit einem zusätzlichen Kondensator C15 möglich.

Zusätzlich zu einer Änderung des Betriebsbereiches des Wechselrichters, die durch eine Änderung im Wechselrichter oder in seiner Beschaltung bewirkt werden kann, läßt sich der erreichbare Kompensationsgrad auch dadurch erhöhen, daß gemäß Fig. 15 in einer Leitung 10 des Netzes mehrere (gleichartige) Wechselrichter 11, 23 und 24 in Serie und/or parallel (Wechselrichter 11, 11') geschaltet werden. Die von den einzelnen Wechselrichtern erzeugten Kompensationsspannungen addieren sich dann zu einer resultierenden, größeren Kompensationsspannung. Besonders vorteilhaft ist bei einer solchen Serienschaltung, daß durch eine untereinander zeitversetzte Taktung der einzelnen Wechselrichter 11, 11', 23 und 24 der Oberschwingungsanteil noch weiter reduziert werden kann. Die einzelnen Wechselrichter 11, 11', 23, 24 der Serienschaltung können für sich jeweils mit einer Filterschaltung aus Induktivitäten L6, ..., L9 und Kondensatoren C11, ..., C13 versehen sein. Ein zusätzlicher Kondensator C14 erweitert auch hier den Betriebsbereich. Eine andere Möglichkeit besteht gemäß Fig. 16 darin, die Serienschaltung insgesamt mit einer Zusatzbeschaltung aus konzentrierten Elementen für die Filterschaltung (Induktivität L3 und Kondensator C6) auszustatten. Der Serien-Kondensator C7 entspricht in seiner Funktion dem Kondensator C14 aus Fig. 15.

Besondere Vorteile bringt die transformatorlose Seriokompensation gemäß der Erfindung bei einer Anwendung im Zusammenhang mit Netztransformatoren des Wechsel-

spannungsnetzes, die eine Niederpotentialseite mit einem neutralen Punkt aufweisen. Ist – wie in Fig. 17 gezeigt – das Netz ein Drehstromnetz und der Netztransformator 25 ein Drehstromtransformator in Sternschaltung (Primärseite 26, Sekundärseite 27), kann die Kompensation auf der Niederpotentialseite am neutralen Punkt (Sternpunkt 31) des Netztransformators 25 erfolgen. Dazu werden mit dem zum Sternpunkt 31 führenden Leitungen 28, 29, 30 jeweils kompensierende Wechselrichter 32, 33 und 34 in Serie geschaltet. Durch die Anordnung der Wechselrichter auf der Niederpotentialseite läßt sich der Isolationsgrad stark herabsetzen, was zu einer Vereinfachung und Verbilligung der Anlage führt.

Bei einem 1-phasigen Netz mit einem 1-phasigen Netztransformator 35 (Fig. 18; Primärseite 36, Sekundärseite 38) mit einem Nullpunkt als neutralem Punkt wird eine entsprechende Anordnung der Kompensationsschaltung auf niedrigem Potential dadurch verwirklicht, daß Wechselrichter 41, 42 mit den zum Nullpunkt 39 führenden Leitungen 38, 40 in Serie geschaltet werden. Es ist aber auch denkbar, anstelle der beiden Wechselrichter 41, 42 nur einen Wechselrichter (41 oder 42) zu verwenden.

Die Kompensationsanordnungen nach Fig. 17 und 18, die jeweils mehrere Wechselrichter 32, ..., 34 bzw. 41, 42 umfassen, können durch geschicktes Zusammenfassen der Wechselrichter in einer Brücke vereinfacht werden. Die aus Fig. 17 hervorgehende vereinfachte Anordnung ist in Fig. 19 wiedergegeben. Die Leitungen 28, 29 und 30 werden in diesem Fall an die Ausgänge eines 3-phasigen Wechselrichters angeschlossen, die über gesteuerte Umschalter US, U6 und U7 gemäß Fig. 3, 4 wahlweise mit den Enden einer Serieschaltung aus zwei aufgeladenen Kondensatoren C6 und C7 verbunden werden, deren Mittelabgriff an den Sternpunkt 31 angeschlossen ist. Es ist aber auch denkbar, die Schaltungen aus Fig. 17 und 19 miteinander zu kombinieren, d. h., bei der Schaltung aus Fig. 19 in die Leitungen 28, 29 und 30 zusätzlich einzelne Wechselrichter (wie die Wechselrichter 32, 33 und 34 in Fig. 17) in Serie zu schalten, um die Flexibilität der Kompensationsschaltung zu erhöhen.

Die analoge Vereinfachung für die Anordnung nach Fig. 18 ist in Fig. 20 wiedergegeben. Hier werden die Leitungen 38, 40 über Umschalter U8, U9 wahlweise mit den Enden einer Serieschaltung aus geladenen Kondensatoren C8 und C9 verbunden, deren Mittelabgriff an den Nullpunkt 39 angeschlossen ist. In den in Fig. 17 bis 20 dargestellten Fällen kann der neutrale Punkt (Sternpunkt 31 bzw. Nullpunkt 39) geerdet sein (gestrichelt eingezeichnet). Eine solche Erdung ist aber nicht zwingend notwendig.

Geben die Kompensationseinrichtungen gemäß der Erfindung reine Blindleistung ab, werden die Kondensatoren C1, ..., C3 bzw. C6, ..., C9, welche die Gleichspannung für den Wechselrichter bereitstellen, vorteilhafterweise durch geeignete Steuerung des Wechselrichters direkt aus der Netzeleitung geladen. Es entfallen dadurch zusätzliche Verbindungen von anderen Teilen des Netzes zu den Kondensatoren. Es kann aber auch wünschenswert sein, neben der Blindleistung auch Wirkleistung in die zu kompensierende Leitung einzuspeisen. In diesem Falle ist es denkbar, die Kondensatoren C1, ..., C3 bzw. C6, ..., C9 durch eine geeignete (separate) Gleichspannungsversorgung (z. B. einen Stromrichter) aufzuladen bzw. nachzuladen.

Insgesamt ergibt sich mit der Erfindung eine stark vereinfachte und sehr flexibel einsetzbare Kompensation von Blindleistung für ein Wechselspannungsnetz.

Bezugszeichenliste

10; 16, . . . , 18; 22 Leitung	
11, 11' Wechselrichter	
12, . . . , 15 Halbbrücke	5
19, . . . , 21 Wechselrichter	
23, 24 Wechselrichter	
25, 35 Netztransformator	
26, 36 Primärseite	
27, 37 Sekundärseite	10
28, . . . , 30 Leitung	
31 Sternpunkt	
38, 40 Leitung	
39 Nullpunkt	
41, 42 Wechselrichter	15
43 Saugkreis	
44, 45 Schalter	
46 Netztransformator	
C1, . . . , C15 Kondensator	
D1,2 Diode	20
L1, . . . , L11 Induktivität	
S1, . . . , S6 Leistungshalbleiter (abschaltbar)	
S11, . . . , S6n Leistungshalbleiter (abschaltbar)	
U1, . . . , U9 Umschalter	
U _M Modulationssignal (sinusförmig)	25
U _{C1} , . . . , U _{C4} Trägersignal (dreieckförmig)	
U ₁₂ , U ₃₄ Kompensationsteilspannung	
U _{comp} Kompensationsspannung	

Patentansprüche

1. Verfahren zum Einspeisen von Blindleistung in ein Wechselspannungsnetz, bei welchem Verfahren für wenigstens eine Leitung (10; 16, . . . , 18; 28, . . . , 30; 38, 40) des Netzes eine zum Strom in der Leitung (10; 16, . . . , 18; 28, . . . , 30; 38, 40) phasenverschobene Kompensationsspannung (U_{comp}) erzeugt und in die Leitung (10; 16, . . . , 18; 28, . . . , 30; 38, 40) eingekoppelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß die Kompensationsspannung (U_{comp}) aus einer Gleichspannung mittels eines mit abschaltbaren Leistungshalbleitern (S1, . . . , S6; S11, . . . , S6n) in Brückenschaltung aufgebauten Wechselrichters (11; 19, . . . , 21; 41, 42) erzeugt wird, und daß die Kompensationsspannung (U_{comp}) direkt in die Leitung (10; 16, . . . , 18; 28, . . . , 30; 38, 40) seriell eingekoppelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als Gleichspannungsquelle für den Wechselrichter (11; 19, . . . , 21; 41, 42) wenigstens ein aufgeladener Kondensator (C1, . . . , C9) verwendet wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der wenigstens eine Kondensator (C1, . . . , C9) über den Wechselrichter (11; 19, . . . , 21; 41, 42) aus der Leitung (10; 16, . . . , 18; 28, . . . , 30) des Wechselspannungsnetzes aufgeladen wird.
4. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der wenigstens eine Kondensator (C1, . . . , C9) über eine separate Gleichspannungsversorgung aufgeladen wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Wechselspannungsnetz 3-phasisig ausgebildet ist, und daß für jede der 3 Phasen in einer zugehörigen Leitung (16, . . . , 18) ein zugehöriger Wechselrichter (19, . . . , 21) zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung (U_{comp}) in Serie geschaltet ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechselrichter (11;

- 19, . . . , 21; 41, 42) jeweils zwei Halbbrücken (12, 13 bzw. 14, 15) umfassen, und daß die Halbbrücken (12, 13 bzw. 14, 15) nach Maßgabe eines sinusförmigen Modulationssignals (U_M) pulsdauermoduliert angesteuert werden.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechselrichter (11; 19, . . . , 21; 41, 42) als 2-Punkt-Brücken ausgebildet sind, und daß die einzelnen Halbbrücken (12, 13) durch Anwendung entsprechender Trägersignale (U_{C1}, U_{C2}) zeitversetzt getaktet werden.
8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechselrichter (11; 19, . . . , 21; 41, 42) als N-Punkt-Brücken (N ≥ 3) ausgebildet sind, und daß die einzelnen Halbbrücken (14, 15) durch Anwendung entsprechender Trägersignale (U_{C1}, . . . , U_{C4}) derart zeitversetzt getaktet werden, daß sich die resultierende Kompensationsspannung (U_{comp}) aus einer Überlagerung mehrerer zeitversetzt getakteter pulsdauermodulierter Kompensationsteilspannungen (U₁₂, U₃₄) ergibt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß in wenigstens einer Leitung (10) des Wechselspannungsnetzes mehrere Wechselrichter (11, 11', 23, 24) zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung (U_{comp}) in Serie und/oder parallel geschaltet sind.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechselrichter (11, 11', 23, 24) jeweils pulsdauermoduliert angesteuert werden, und daß die Pulsdauermodulation in den einzelnen Wechselrichtern (11, 11', 23, 24) mit zeitversetzter Taktung erfolgt.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß am Ausgang der Wechselrichter (11; 11', 19, . . . , 21; 41, 42) eine Filterschaltung (L1, . . . , L3; L6, . . . , L10, C4, C6, C11, . . . , C13) angeordnet ist.
12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Filterschaltung wenigstens eine zum Wechselrichter (11; 11', 19, . . . , 21; 41, 42) in Serie geschaltete Induktivität (L1, . . . , L3; L6, . . . , L9) und wenigstens einen zu der Serieschaltung aus Wechselrichter (11; 11', 19, . . . , 21; 41, 42) und der wenigstens einen Induktivität (L1, . . . , L3; L6, . . . , L9) parallel geschalteten Kondensator (C4, C6, C11, . . . , C13) umfaßt.
13. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Wechselspannungsnetz einen Netztransformator (46) mit Streuinduktivitäten (L10, L11) umfaßt, und die Streuinduktivität (L10, L11) des Netztransformators (46) als Teil der Filterschaltung verwendet wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Wechselrichter (11; 19, . . . , 21; 41, 42) zur Erweiterung des Arbeitsbereiches jeweils mit wenigstens einem Kondensator (C5, C7) und/oder mit einer Induktivität (L1, L2, L3) in Serie geschaltet sind.
15. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Wechselspannungsnetz einen Netztransformator (25, 35) mit einem auf niedrigem Potential liegenden neutralen Punkt (31, 39) aufweist, und daß die Kompensationsspannung (U_{comp}) am neutralen Punkt (31, 39) eingekoppelt wird.
16. Verfahren nach einem Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, daß das Wechselspannungsnetz ein 3-phasisiges Netz ist, daß innerhalb des Netzes ein 3-phasisiger Netztransformator (25) vorgesehen ist, welcher als neutralen Punkt einen Sternpunkt (31) aufweist,

und daß in jede der zum Sternpunkt (31) führenden Leitungen (28, ..., 30) eine entsprechende Kompensationsspannung (U_{comp}) eingekoppelt wird.

17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß in jede der zum Sternpunkt (31) führenden Leitungen (28, ..., 30) jeweils ein Wechselrichter (32, ..., 34) zur Erzeugung und Einkopplung einer Kompensationsspannung (U_{comp}) in Serie geschaltet ist, und/oder daß die zum Sternpunkt (31) führenden Leitungen (28, ..., 30) an die Ausgänge eines 3-phasi-
gen Wechselrichters (U5, ..., U7; C6,7) angeschlossen sind.

18. Verfahren nach Anspruch 17, dadurch gekenn-
zeichnet, daß die zum Sternpunkt (31) führenden Leitungen (28, ..., 30) an die Ausgänge eines 3-phasi-
gen Wechselrichters (U5, ..., U7; C6,7) angeschlossen
sind, und daß der 3-phasiige Wechselrichter als N-
Punkt-Brücke ($N \geq 2$) ausgebildet ist.

19. Verfahren nach Anspruch 15, dadurch gekenn-
zeichnet, daß das Wechselspannungsnetz 1-phasisig ist,
daß innerhalb des Netzes ein 1-phasieriger Netztransfor-
mator (35) vorgesehen ist, der zumindest auf einer
Seite eine Nullpunktsschaltung mit einem Nullpunkt
(39) als neutralen Punkt aufweist, und daß in jede der
zum Nullpunkt (39) führenden Leitungen (38, 40) eine
entsprechende Kompensationsspannung (U_{comp}) einge-
koppelt wird.

20. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekenn-
zeichnet, daß in jede der zum Nullpunkt (39) führenden
Leitungen (38, 40) ein Wechselrichter (41, 42) zur Er-
zeugung und Einkopplung einer Kompensationsspan-
nung (U_{comp}) in Serie geschaltet ist.

21. Verfahren nach Anspruch 19, dadurch gekenn-
zeichnet, daß die zum Nullpunkt (39) führenden Leitungen
(38, 40) an die Ausgänge eines 1-phasiigen
Wechselrichters (U8, 9; C8, 9) angeschlossen sind.

22. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeich-
net, daß dem wenigstens einen Kondensator (C1, ...,
C9) ein Saugkreis (43) parallelgeschaltet ist.

23. Wechselrichter für das Verfahren nach einem der
Ansprüche 1 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der
Wechselrichter (11; 19, ..., 21; 41, 42) als N-Punkt-
Brücke ($N \geq 2$) ausgebildet ist.

24. Wechselrichter nach Anspruch 23, dadurch ge-
kennzeichnet, daß in dem Wechselrichter nur ein Lei-
stungshalbleiter (S1, S2; S3, ..., S6) pro Brückenzweig
angeordnet ist.

25. Wechselrichter nach Anspruch 23, dadurch ge-
kennzeichnet, daß in dem Wechselrichter mehrere in
Serie geschaltete Leistungshalbleiter (S11, ...,
S1n; ..., S61, ..., S6n) pro Brückenzweig angeordnet
sind.

26. Wechselrichter nach einem der Ansprüche 24 und
25, dadurch gekennzeichnet, daß als abschaltbare Lei-
stungshalbleiter IGBTs verwendet werden.

27. Wechselrichter nach einem der Ansprüche 24 und
25, dadurch gekennzeichnet, daß als abschaltbare Lei-
stungshalbleiter GTOs verwendet werden.

28. Wechselrichter nach Anspruch 27, dadurch ge-
kennzeichnet, daß in dem Wechselrichter mehrere in
Serie geschaltete GTOs pro Brückenzweig angeordnet
sind, und daß die in Serie geschalteten GTOs hart ange-
steuert werden.

- Leerseite -

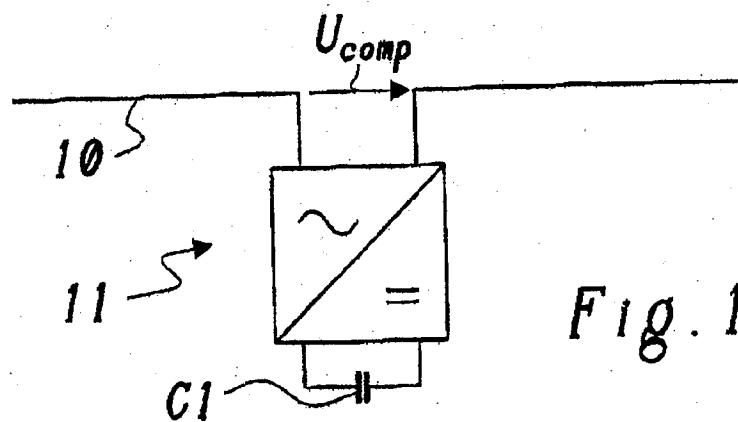


Fig. 1

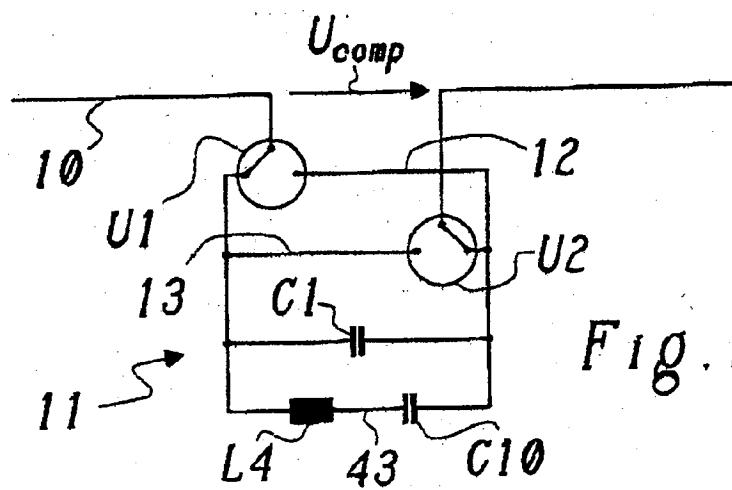


Fig. 2

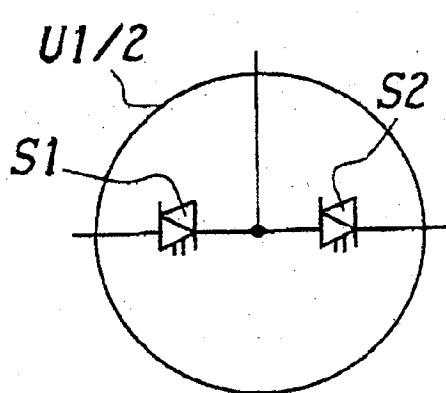


Fig. 3

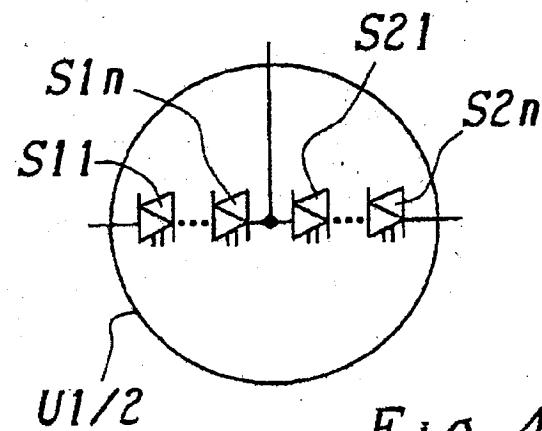


Fig. 4

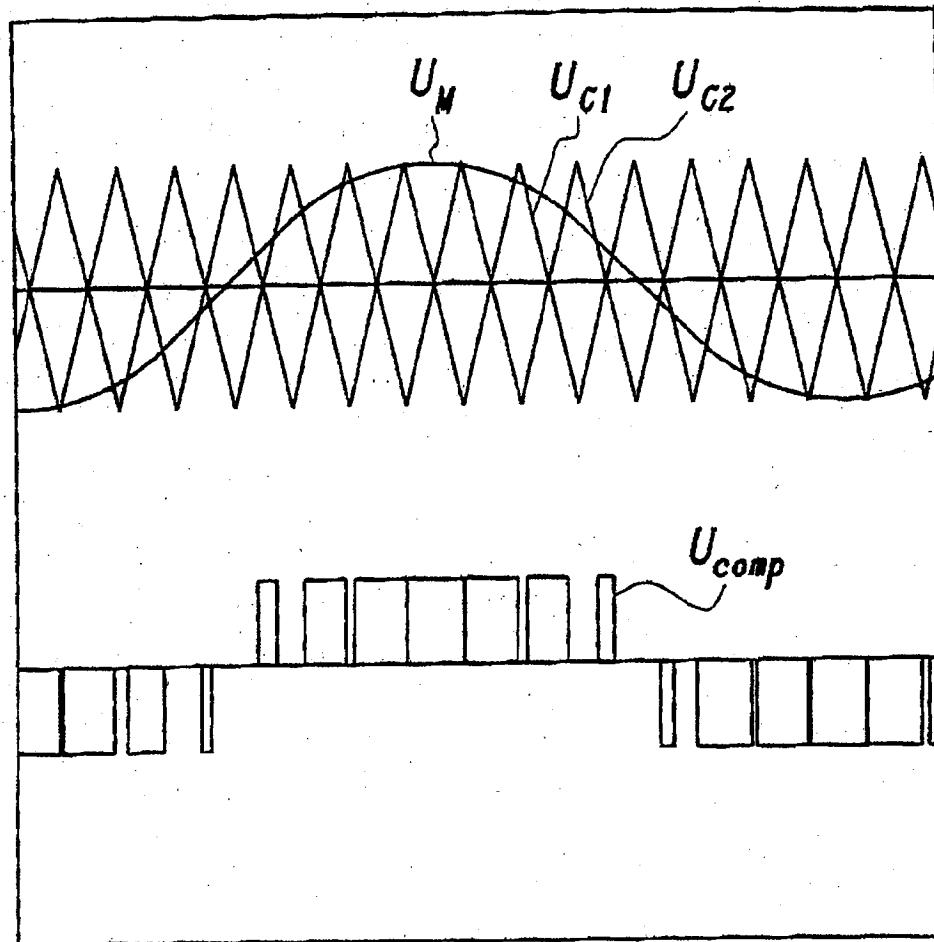


Fig. 5

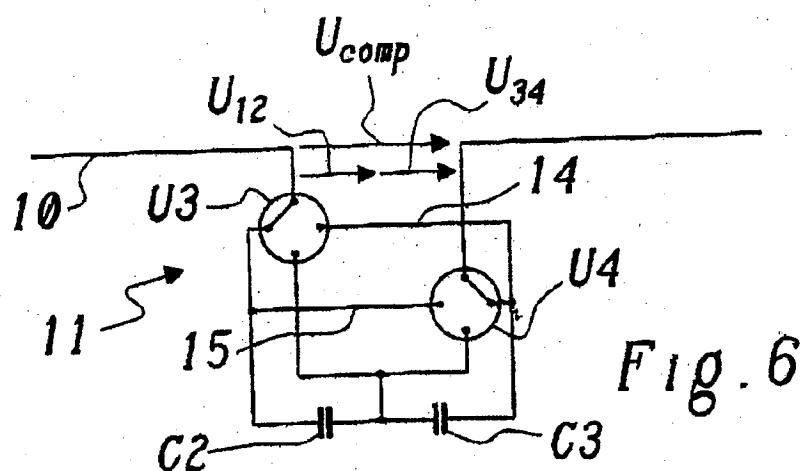


Fig. 6

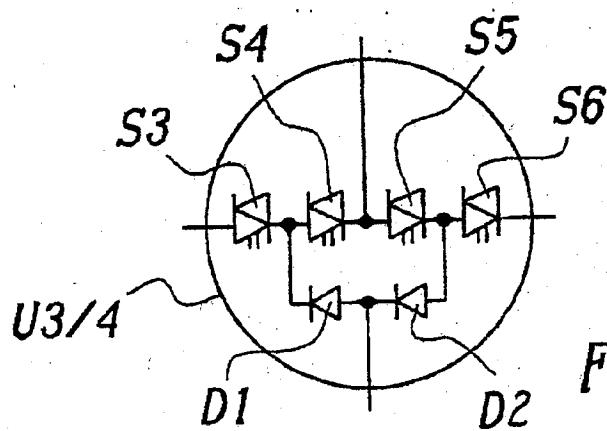


Fig. 7

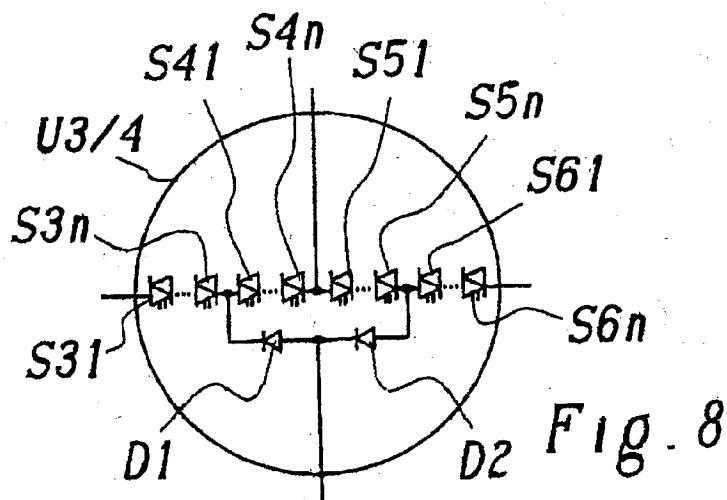


Fig. 8

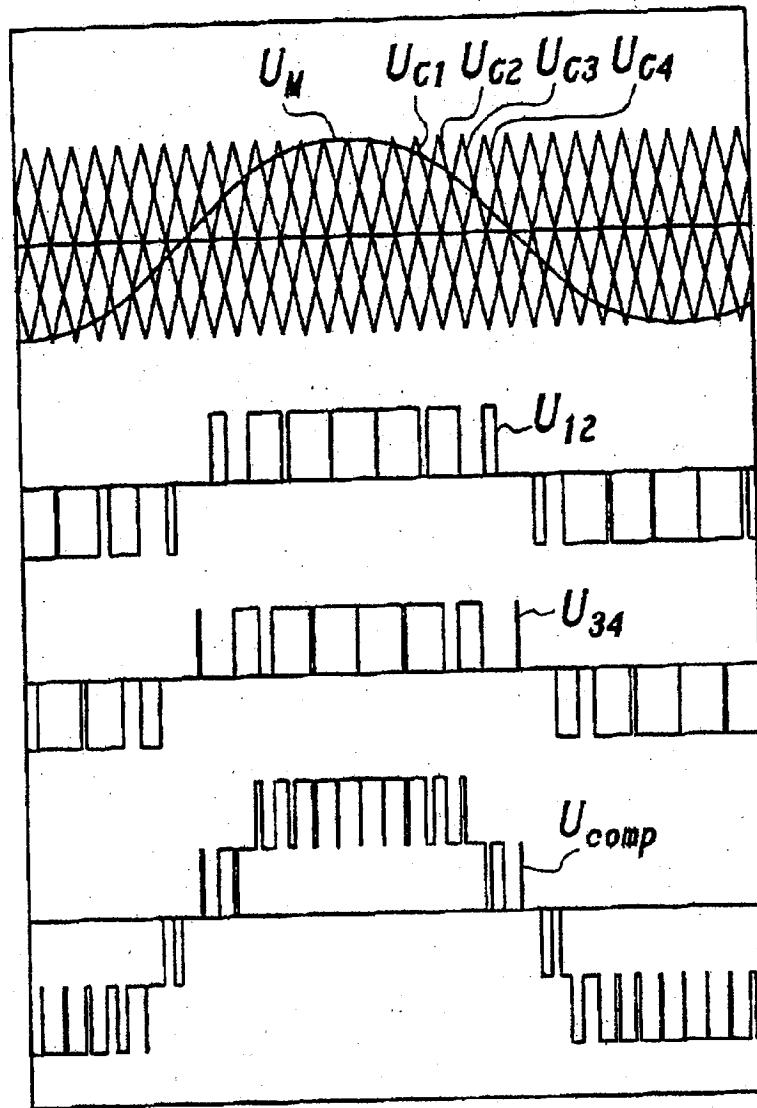


Fig. 9

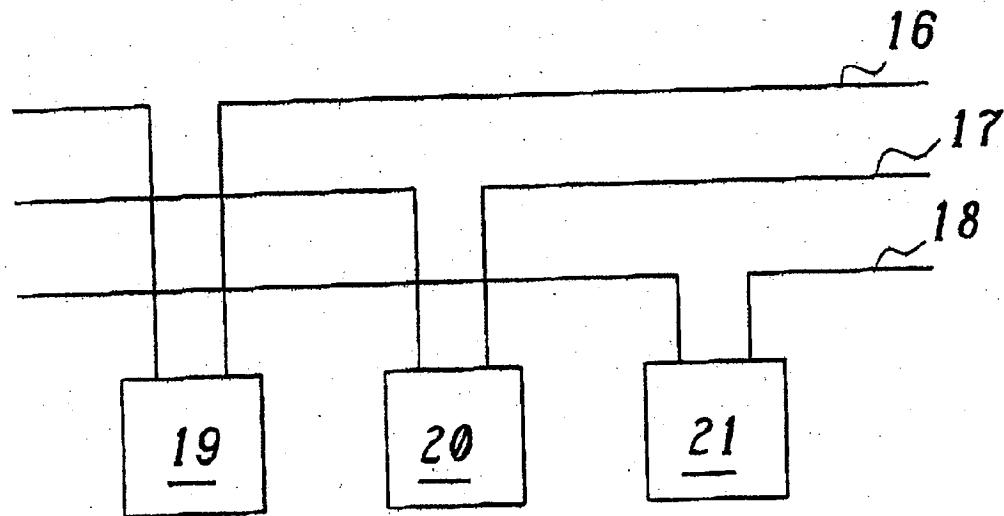


Fig. 10

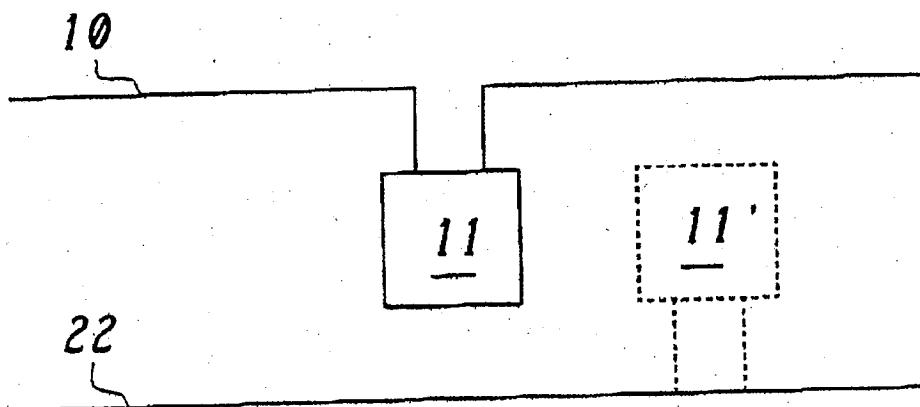


Fig. 11

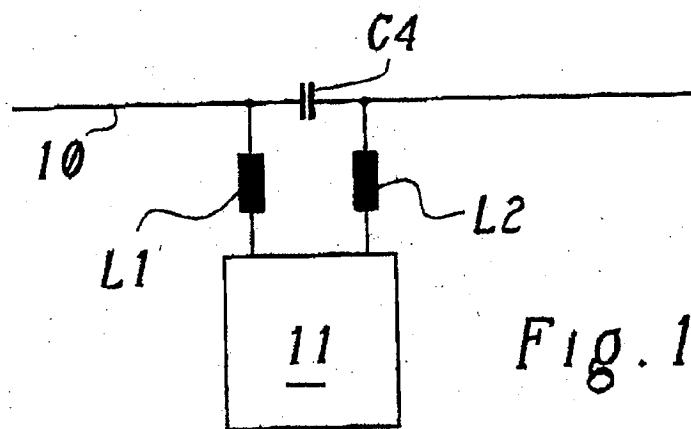


Fig. 12

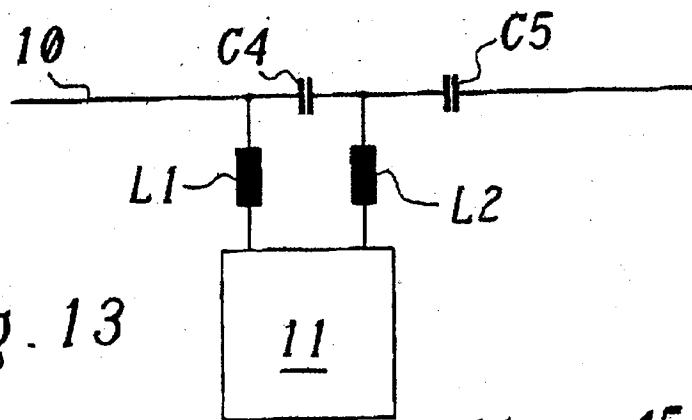


Fig. 13

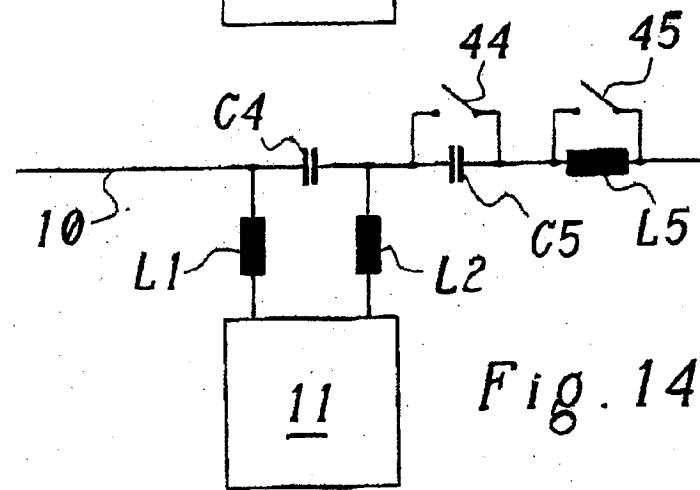


Fig. 14

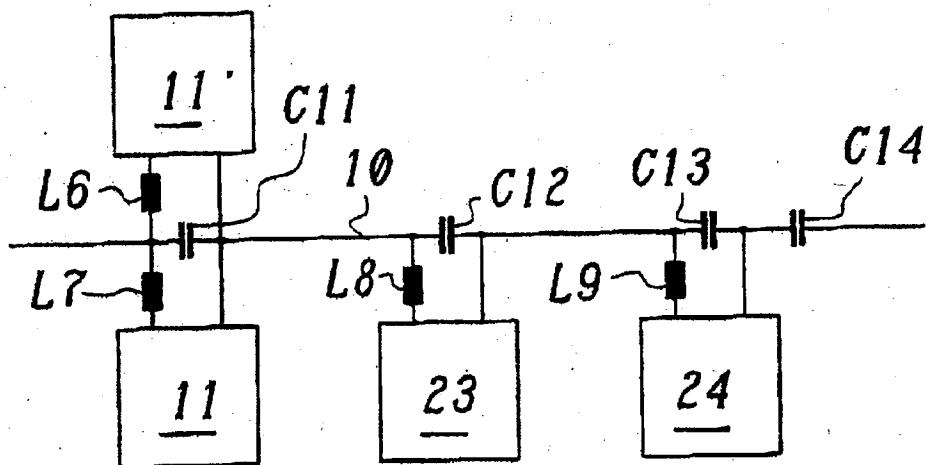


Fig. 15

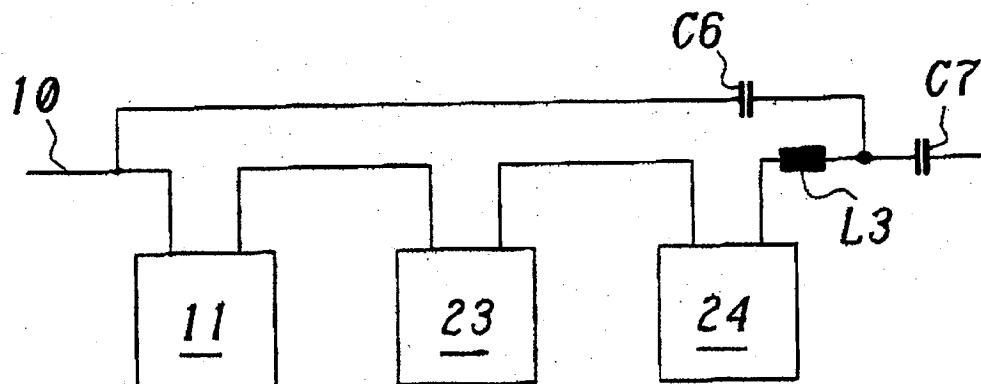
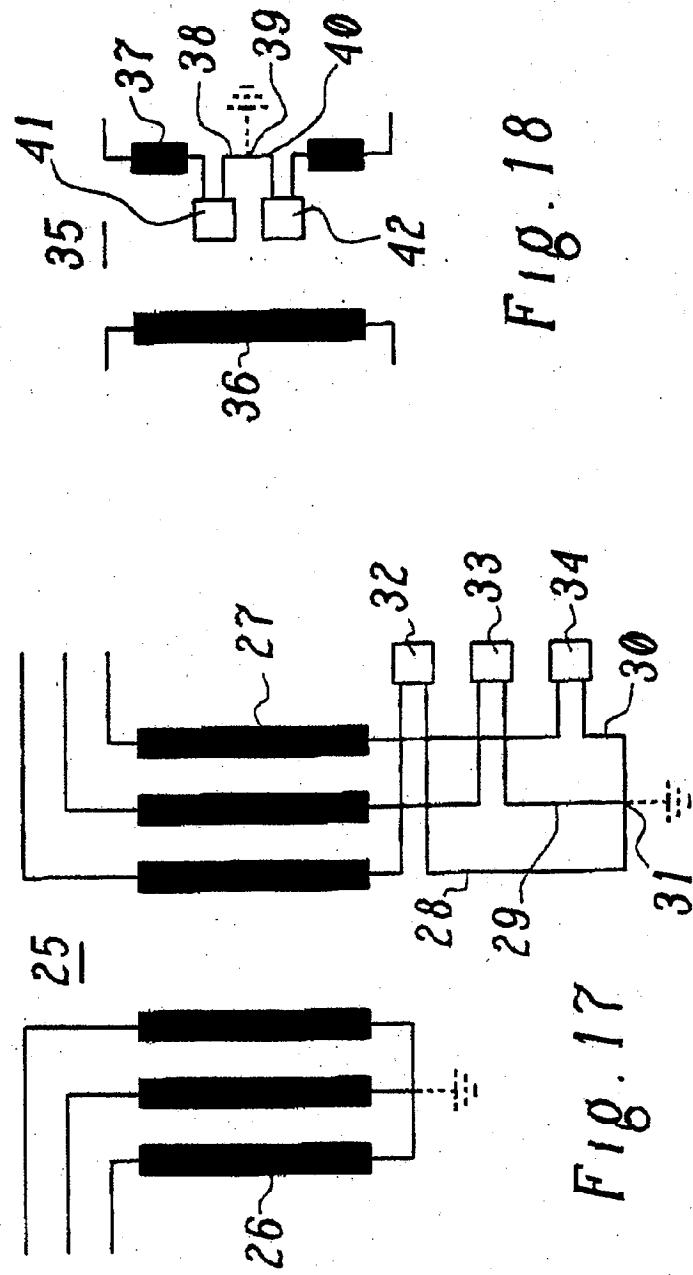
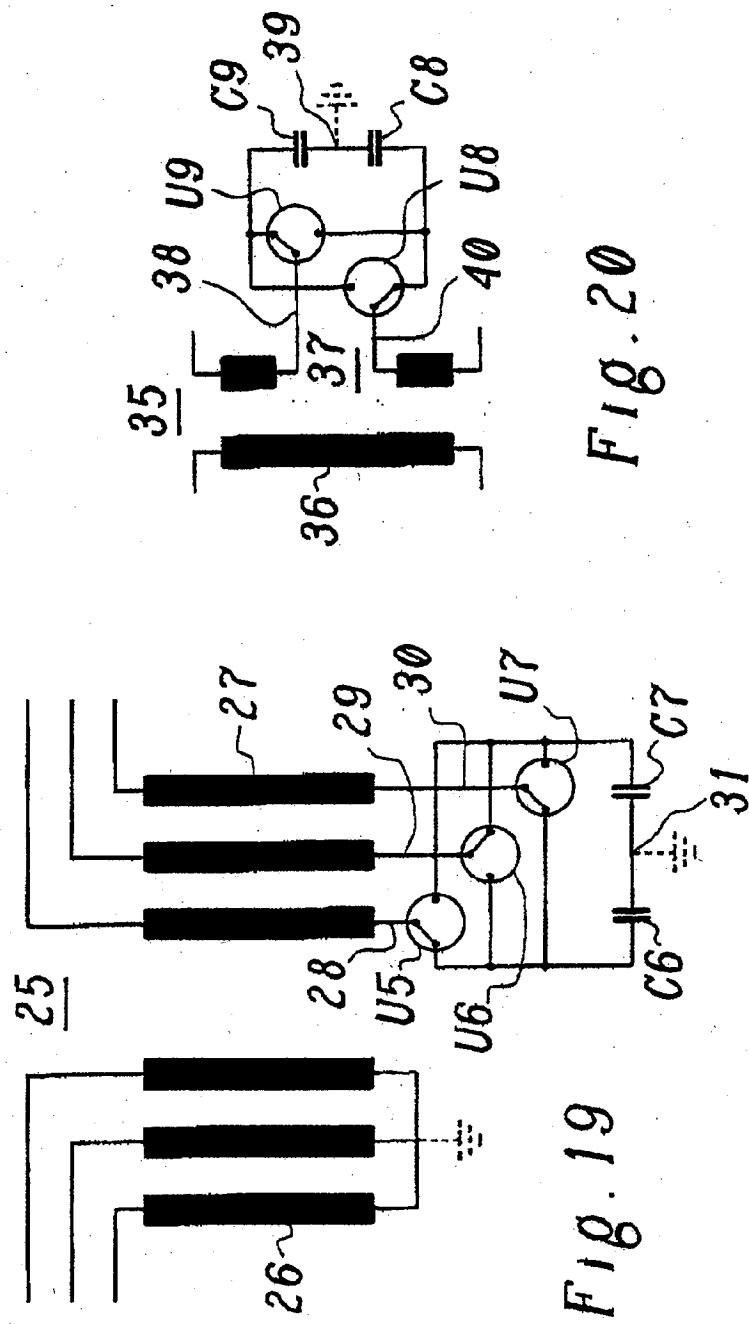


Fig. 16





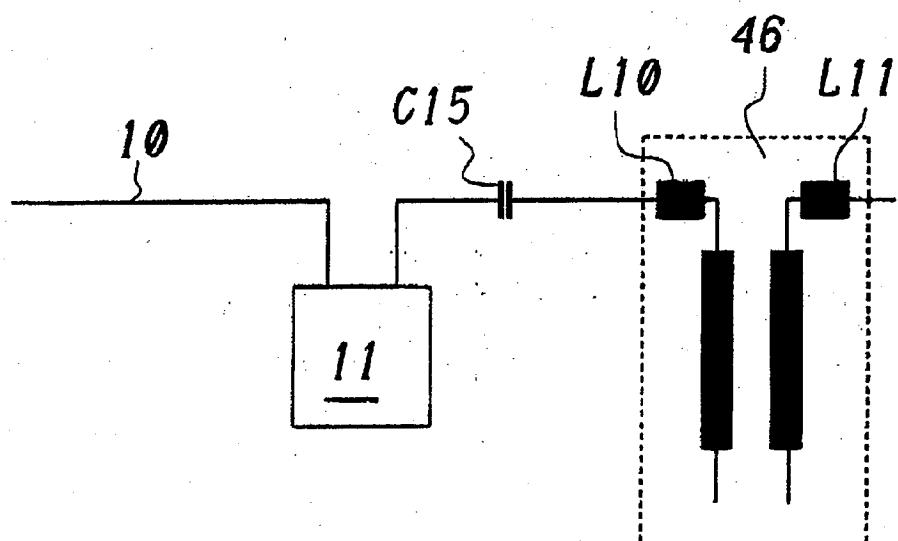


Fig. 21